磷酸一二钙对肉鸭相对生物学利用率的研究

李文静 常文环* 陈志敏 郑爱娟 刘国华

（中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点开放实验室，生物饲料开发国家工程研究中心，北京 100081）

摘 要：本试验采用双因子随机分组试验设计，旨在研究磷酸一二钙（MDCP）和磷酸氢钙（DCP）及其添加水平（前期为0.075%、0.150%、0.225%、0.300%和0.375%，后期为0.12%、0.18%、0.24、0.30%）对肉鸭生长性能、血清生化指标和胫骨指标的影响，以评价MDCP对肉鸭的相对生物学利用率。试验前期（1~21日龄）共选用960只1日龄樱桃谷肉鸭，随机分成10个组，每组6个重复，每个重复16只鸭；试验后期（22~42日龄）选用720只22日龄樱桃谷肉鸭，随机分成8个组，每组6个重复，每个重复15只鸭。试验期42 d。结果表明：1）1~21日龄，随着MDCP或DCP添加水平由0.075%上升到0.225%，肉鸭的平均日增重和平均日采食量显著提高（P<0.05）；0.075% MDCP添加组肉鸭的料重比显著高于其他MDCP添加组（P<0.05）。22~42日龄，0.12% MDCP或DCP添加组肉鸭的平均日增重、平均日采食量显著低于其他MDCP或DCP添加组（P<0.05）；0.12% DCP添加组肉鸭的料重比高于其他DCP添加组（P＞0.05），0.30% MDCP添加组的料重比显著低于其他MDCP添加组（P<0.05）。2）磷来源与添加水平互作显著影响21日龄肉鸭的胫骨强度（P<0.05），MDCP添加组肉鸭的胫骨强度显著高于DCP添加组（P<0.05）；磷添加水平对21日龄肉鸭胫骨指标的影响显著（P<0.05）。42日龄肉鸭的胫骨灰分、钙、磷含量以及胫骨强度随着磷添加水平的增加而线性升高；磷来源与添加水平互作对42日龄肉鸭胫骨钙含量的影响显著（P<0.05）。3）21日龄，MDCP添加组肉鸭的血清磷含量显著低于DCP添加组（P<0.05），0.075% MDCP或DCP添加组血清钙、磷含量显著高于其他MDCP或DCP添加组（P<0.05），0.075%、0.150% MDCP或DCP添加组血清碱性磷酸酶活性显著高于其他MDCP或DCP添加组（P<0.05）。42日龄，肉鸭血清磷含量和碱性磷酸酶活性随DCP或MDCP添加水平的升高而逐渐降低，0.12% DCP添加组的血清磷含量显著高于其他DCP添加组（P<0.05）。结果提示，MDCP可以替代DCP作为肉鸭饲粮的磷来源；MDCP为磷来源时，1~21日龄肉鸭适宜的非植酸磷水平为0.355%，22~42日龄肉鸭适宜的非植酸磷水平为0.305%。综合肉鸭体重、体增重和胫骨矿化指标，肉鸭MDCP相对于DCP（100%）的生物学利用率是109.85%。

关键词：肉鸭：磷酸一二钙；磷酸氢钙；生物学利用率

中图分类号：S834

收稿日期：2017-12-13

基金项目：中国农业科学院科技创新工程协同创新任务子任务“瘦肉型北京鸭饲料配制技术研究与示范”（CAAS-XTCX201611）

作者简介：李文静（1993—），女，河北张家口人，硕士研究生，从事家禽营养与饲料科学研究。E-mail：2490154978@qq.com

*通信作者：常文环，副研究员，硕士生导师，E-mail: changwenhuan@caas.cn

磷是动物生长过程中不可缺少的必需营养元素[1]，在植物性饲料原料为主的家禽饲粮中，约 2/3 磷的存在形式为植酸磷，而植酸磷是不能被家禽有效利用的，因此家禽饲粮中的磷主要来自外源添加的无机磷与动物性饲料中的磷[2]。当前，磷酸氢钙（dibasic calcium phosphate，DCP）是使用最广的无机磷源，但是DCP属于枸溶性磷酸盐（溶于盐酸和柠檬酸），难溶于水，动物对其有效成分的吸收率低（不到 60%），其余钙、磷随粪尿排出，既造成环境的污染又带来极大的成本负担。DCP是动物饲粮中使用最多的磷源，价格也相对较高，为了缓解DCP日渐缺乏以及在饲料成本中需求高的问题，研究者开展了大量的工作以寻求新的磷源[3]。磷酸一二钙（mono-calcium and di-calcium phosphate，MDCP）又称DCP III型，是DCP和磷酸二氢钙（mono-calcium phosphate，MCP）的共晶结合物，是一种枸溶性与水溶性相结合的高效低污染型钙、磷补充剂，在国际上使用广泛，在国内还处于推广阶段[4]。本研究以肉鸭为研究对象，以DCP作为参照物，以生长性能、血清生化指标和胫骨指标来评定MDCP的相对生物学价值及其最佳添加比例，为其在肉鸭养殖中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计与饲养管理

本试验采用双因子随机分组试验设计。试验共分 2 个阶段，试验前期（1~21 日龄）和试验后期（22~42 日龄）。试验前期选用 960 只 1 日龄樱桃谷肉鸭，随机分为 10 个组，每组 6 个重复，每个重复 16 只。试验后期选用 720 只 22 日龄樱桃谷肉鸭，随机分成 8 个组，每组 6 个重复，每个重复 15 只。采用玉米-豆粕型基础饲粮，试验组分别在基础饲粮中添加 MDCP 或 DCP 替代其中的部分石粉和沸石粉，以磷元素计，试验前期磷添加水平分别为 0.075%、0.150%、0.225%、0.300%和 0.375%，试验后期磷添加水平分别为 0.12%、0.18%、0.24%、0.30%。MDCP 和 DCP 的钙、磷含量见表 1。试验饲粮除非植酸磷、总磷及钙磷比外，其他营养水平与基础饲粮保持一致，基础饲粮组成及营养水平见表 2。

表 1 磷酸氢钙和磷酸一二钙的钙、磷含量

Table 1 Calcium and phosphorus contents of DCP and MDCP %

项目 Items	说明 Description	钙 Ca	磷 P
磷酸氢钙 DCP	北京化工厂，分析纯	≥22.8	≥17.7
磷酸一二钙 MDCP	云南磷化集团，饲料级	≥14.0	≥21.0

表 2 基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 2　Composition and nutrient levels of basal diets （air-dry basis）　%

项目 Items	含量 Content	
	1~21 日龄 1 to 21 days of age	22~42 日龄 22 to 42 days of age
原料 Ingredients		
玉米 Corn	62.49	70.26
豆粕 Soybean meal	30.62	24.02
豆油 Soybean oil	1.60	1.12
L-赖氨酸 *L*-Lys	0.18	0.16
DL-蛋氨酸 *DL*-Met	0.30	0.18
食盐 NaCl	0.30	0.35
甜菜碱 Betaine	0.20	0.20
预混料 Premix[1)]	0.20	0.42
氯化胆碱 Choline chloride	0.20	0.20
石粉 Limestone	2.49	2.26
沸石粉 Zeolite	1.42	0.83
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]		
代谢能 ME/(MJ/kg)	12.13	12.33
粗蛋白质 CP	20.05	17.52
钙 Ca	1.02	0.89
总磷 TP	0.37	0.38
非植酸磷 NPP	0.13	0.13
赖氨酸 Lys	1.15	0.99
蛋氨酸 Met	0.59	0.45
蛋氨酸＋半胱氨酸 Met+Lys	0.85	0.71

[1)]预混料为每千克饲粮提供 Premix provided the following per kg of diets：VA 15 000 IU，VD_3 3 900 IU，VE 30 IU，VK_3 3 mg，VC_1 2.4 mg，VC_2 9 mg，VC_6 4.5 mg，VC_{12} 0.021 mg，泛酸 pantothenic acid 30 mg，尼克酰胺 nicotinamide 45 mg，叶酸 folic acid 1.2 mg，生物素 biotin 0.18 mg，Cu （$CuSO_4 \cdot 5H_2O$） 8 mg，Mn （$MnSO_4 \cdot H_2O$） 100 mg，Zn （$ZnSO_4 \cdot 6H_2O$） 40 mg，

Fe （$FeSO_4 \cdot 6H_2O$） 80 mg，I （KI） 0.35 mg，Se （Na_2SeO_3） 0.15 mg。

[2]代谢能和非植酸磷为计算值，其他营养水平为实测值。ME and NPP were calculated values, while the other nutrient levels were measured values。

试验鸭饲养于层叠式肉鸭笼，配有乳头式饮水器和金属料槽。试验期间24 h光照，试验鸭自由采食和饮水，每天观察鸭的精神状态、食欲及粪便情况，记录死亡只数。按常规程序进行预防免疫。肉鸭购自香河正大孵化场，DCP和MDCP分别来源于北京化工厂和云南磷化集团有限公司。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 生长性能

分别于试验第 21 天和第 42 天对肉鸭以重复为单位进行称重，记录耗料量，计算试验前期和试验后期的平均体重（BW）、平均日增重（ADG）、平均日采食量（ADFI）、料重比（F/G）和死淘率。

1.2.2 胫骨强度及胫骨灰分、钙、磷含量

试验第 21 天和第 42 天，每个重复选取 1 只鸭，屠宰解剖，取左侧胫骨去除肌肉和筋腱，称重，立即使用游标卡尺测量胫骨长度和胫骨折断力。利用 TA-XY2 型质构仪测定胫骨折断力（即胫骨强度）。参数设置：跨度 40 mm，位移速度 10 mm/min，匀速加载至标本断裂，记录胫骨断裂时的强度。将折断的胫骨用滤纸包好后，置入无水乙醇中浸泡 24 h 脱水，继用乙醚抽提 24 h 脱脂，采用马沸炉 550~600 ℃灰化 24 h 制得胫骨灰分(GB/T 6438-1992)。胫骨钙含量采用原子吸收光谱法测定[5]。胫骨磷含量采用磷钼酸铵比色法测定(GB/T 6438-1992) 。

1.2.3 血清生化指标

在进行 1.2.2 操作的同时，颈静脉采血 4 mL，静置 1 h 后，4 ℃下 3 000 r/min 离心 15 min，制备血清。血清钙含量用邻甲酚酞比色法测定，血清磷含量用紫外法测定，血清碱性磷酸酶(AKP)活性采用速率法，使用全自动生化分析仪测定。

1.4 数据统计与分析

采用 SPSS 19.0 软件中 GLM 程序对所有试验数据进行双因子方差分析，统计模型中包括磷来源、添加水平以及二者的互作，每个重复笼为 1 个试验单元。方差分析差异显著者，以 LSD 法比较平均值间的差异显著性；不相关比较法检测所测指标与饲粮添加磷水平间的线性或曲线反应；用 SPSS 19.0 程序中的 GLM 程序中最小二乘法多元线性回归方程：

$Y=b_0+b_1X(s)+b_2X(t)$。

式中：Y 为所测指标，$X(s)$、$X(t)$分别代表 DCP 和 MDCP。以 DCP 为标准（100%），用多元线性回归斜率比法[6]计算 MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率。

2 结果与分析

2.1 不同磷来源和添加水平对肉鸭生长性能的影响

2.1.1 不同磷来源和添加水平对 1~21 日龄肉鸭生长性能的影响

不同磷来源和添加水平对 1~21 日龄肉鸭生长性能的影响见表 3。由表可以看出，磷来源、来源与添加水平互作对肉鸭的末重、平均日增重、平均日采食量和料重比影响不显著（*P*>0.05），但磷添加水平显著影响肉鸭的末重、平均日增重、平均日采食量和料重比（*P*<0.05）。随着 DCP 或 MDCP 添加水平由 0.075%上升到 0.225%，肉鸭末重、平均日增重、平均日采食量显著提高（*P*<0.05）；而 0.225%、0.300%和 0.375%添加组间则差异不显著（*P*>0.05）。各 DCP 添加组的肉鸭料重比差异不显著（*P*>0.05）；而 0.075% MDCP 添加组的肉鸭料重比显著高于其他 MDCP 添加组（*P*<0.05），其他各 MDCP 添加组之间差异不显著（*P*>0.05）。

由此可见，对于 21 日龄肉鸭来说，饲粮中添加 0.225%的 MDCP(饲粮非植酸磷水平为 0.355%)是适宜的。添加 DCP 和 MDCP 的效果差异不明显。

表 3 不同磷来源和添加水平对 1~21 日龄肉鸭生长性能的影响

Table 3 Effects of different phosphorus sources and supplemental levels on growth performance of meat ducks during 1 to 21 days of age

项目 Items		添加水平 Supplemental level/%	末重 Final weight/kg	平均日增重 ADG/g	平均日采食量 ADFI/g	料重比 F/G
来源 Source	磷酸氢钙 DCP	0.075	0.22[a]	12.71[a]	16.52[a]	2.08
		0.150	0.96[b]	44.49[b]	44.49[b]	1.57
		0.225	1.18[c]	55.55[c]	68.79[c]	1.49
		0.300	1.20[c]	54.68[c]	68.11[c]	1.52
		0.375	1.19[c]	53.34[c]	64.36[c]	1.42
	磷酸一二钙 MDCP	0.075	0.19[a]	10.44[a]	12.17[a]	2.12[a]
		0.150	0.88[b]	39.52[b]	48.50[b]	1.54[b]
		0.225	1.18[c]	54.34[c]	65.43[c]	1.47[b]
		0.300	1.14[c]	52.73[c]	63.86[c]	1.55[b]
		0.375	1.23[c]	55.13[c]	66.55[c]	1.47[b]

	SEM	0.233 6	1.138 6	2.889 8	0.043 1
主效应 Main effect					
来源	磷酸氢钙 DCP	1.62	44.14	52.68	1.62
Source	磷酸一二钙 MDCP	1.63	42.43	51.30	1.63
	SEM	0.014	0.643	1.924	0.039
添加水平	0.075	0.20[a]	11.52[a]	14.05[a]	2.10
Supplemental	0.150	0.91[b]	41.46[b]	47.40[b]	1.55
level/%	0.225	1.18[c]	54.96[c]	67.06	1.48
	0.300	1.17[c]	53.70[c]	65.92[c]	1.53
	0.375	1.21[c]	54.80[c]	65.53[c]	1.45
	SEM	0.022	1.016	3.042	0.062
P 值	模型 Model	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
P-value	来源 Source	0.232	0.042	0.067	0.834
	添加水平 Supplemental level	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	来源×添加水平 Source×supplemental level	0.421	0.464	0.387	0.523

同列数据肩标不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），相同或无字母表示差异不显著（$P>0.05$）。下表同。

In the same column, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$). The same as below.

2.1.2　不同磷来源和添加水平对 22~42 日龄肉鸭生长性能的影响

不同磷来源和添加水平对 22~42 日龄肉鸭生长性能的影响见表 4。由表可以看出，磷来源、来源与添加水平互作对肉鸭生长性能的影响不显著（$P>0.05$），但磷添加水平显著影响肉鸭的体重、平均日采食量和料重比（$P<0.05$）。2 种磷来源的 0.12%添加组的末重、平均日增重、平均日采食量显著低于其他 3 组（$P<0.05$），而其他 3 组之间差异不显著（$P>0.05$）。0.12% DCP 添加组的料重比高于其余 DCP 添加组（$P>0.05$），而 0.30% MDCP 添加组的料重比显著低于其余 MDCP 添加组（$P<0.05$）。

由此可见，对于 22～42 日龄肉鸭来说，MDCP 的适宜添加水平为 0.18%（饲粮非植酸磷水平为 0.305%）。

表 4　不同磷来源和添加水平对 22～42 日龄肉鸭生长性能的影响

Table 4　Effects of different phosphorus sources and supplemental levels on growth performance of meat ducks

during 22 to 42 days of age

项目 Items		添加水平 Supplemental level/%	末重 Final weight/kg	平均日增重 ADG/g	平均日采食量 ADFI/g	料重比 F/G
来源 Source	磷酸氢钙 DCP	0.12	2.09^{a}	65.70^{a}	156.55^{a}	2.59
		0.18	2.44^{b}	86.44^{b}	199.98^{b}	2.53
		0.24	2.59^{b}	79.57^{b}	191.06^{b}	2.41
		0.30	2.60^{b}	82.39^{b}	205.56^{b}	2.58
	磷酸一二钙 MDCP	0.12	1.49^{a}	54.31^{a}	119.49^{a}	3.12^{a}
		0.18	2.44^{b}	77.65^{b}	181.36^{b}	2.42^{a}
		0.24	2.63^{b}	86.44^{b}	93.76^{b}	2.32^{a}
		0.30	2.73^{b}	85.29^{b}	180.16^{b}	2.29^{b}
		SEM	0.063	3.426	2.572	0.063
主效应 Main effect						
来源 Source		磷酸氢钙 DCP	2.33	83.67	188.22	2.96
		磷酸一二钙 MDCP	2.32	75.81	168.69	2.54
		SEM	0.065	3.490	2.776	0.044
添加水平 Supplemental level/%		0.12	1.56^{a}	64.96	131.76	3.03
		0.18	2.43^{b}	81.85	190.26	2.47
		0.24	2.61^{b}	82.92	192.47	2.37
		0.30	2.67^{b}	83.90	192.31	2.43
		SEM	0.091	4.930	3.922	0.118
P 值 *P*-value		模型 Model	<0.001	0.016	<0.001	0.006
		来源 Source	0.956	0.116	<0.051	0.625
		添加水平 Supplemental level	<0.001	0.255	<0.001	0.004
		来源×添加水平 Source×supplemental level	0.667	0.052	0.067	0.474

2.2 不同磷来源和添加水平对肉鸭胫骨指标的影响

2.2.1 不同磷来源和添加水平对 21 日龄肉鸭胫骨指标的影响

不同磷来源和添加水平对 21 日龄肉鸭胫骨灰分、钙、磷含量以及胫骨重量、长度、强度的影响见表 5。由表可以看出，磷来源、来源与添加水平互作对肉鸭胫骨灰分、钙、磷含量以及胫骨重量、长度的影响不显著（$P>0.05$），但显著影响肉鸭的胫骨强度（$P<0.05$），MDCP 添加组的胫骨强度高于 DCP 添加组（$P<0.05$）。磷添加水平对 21 日龄肉鸭各胫骨指标的影响显著（$P<0.05$），且肉鸭胫骨灰分、钙、磷含量以及胫骨重量、长度、强度随着磷添加水平的增加而呈升高趋势。

2.2.2 不同磷来源和添加水平对 42 日龄肉鸭胫骨指标的影响

不同磷来源和添加水平对 42 日龄肉鸭胫骨灰分、钙、磷含量以及胫骨重量、长度、强度的影响见表 6。由表可以看出，磷添加水平对 42 日龄肉鸭的各胫骨指标的影响显著（$P<0.05$），胫骨灰分、钙、磷含量以及胫骨强度随着磷添加水平的增加而线性升高。磷来源与添加水平互作对 42 日龄肉鸭胫骨钙含量的影响显著（$P<0.05$）。磷来源对肉鸭各胫骨指标的影响不显著（$P>0.05$）。

表 5　不同磷来源和添加水平对 21 日龄肉鸭胫骨指标的影响

Table 5　Effects of different phosphorus sources and supplemental levels on tibia indexes of meat ducks at 21 days of age

项目 Items		添加水平 Supplemental level/%	胫骨灰分含量 Tibia ash content/%	胫骨钙含量 Tibia Ca content/%	胫骨磷含量 Tibia P content/%	胫骨重量 Tibia weight/g	胫骨长度 Tibia length/mm	胫骨强度 Tibia strength/g
来源 Source	磷酸氢钙 DCP	0.075	34.81[ab]	13.31[a]	4.28[a]	1.48[a]	64.76[a]	12 150.01[a]
		0.150	31.32[a]	23.32[c]	4.21[a]	3.21[b]	92.43[b]	13 426.50[b]
		0.225	37.45[ab]	18.12[b]	4.60[ab]	3.33[bc]	92.01[b]	13 540.76[b]
		0.300	38.48[ab]	22.16[c]	5.54[ab]	3.89[c]	94.31[b]	14 781.02[b]
		0.375	41.38[b]	23.30[c]	6.37[b]	3.64[bc]	93.39[b]	18 058.87[c]
	磷酸一二钙 MDCP	0.075	28.50[a]	12.72[a]	3.14[a]	1.57[a]	64.05[a]	12 969.41[a]
		0.150	29.61[a]	12.96[a]	4.15[a]	2.96[b]	87.26[b]	13 319.18[a]
		0.225	36.93[b]	24.10[b]	6.42[b]	3.29[bc]	91.34[b]	15 501.54[b]
		0.300	41.11[c]	22.57[b]	6.85[b]	3.70[c]	91.17[b]	16 673.34[b]
		0.375	42.11[c]	26.42[b]	7.00[b]	3.75[c]	94.57[b]	20 843.27[c]
		SEM	4.766	2.580	1.322	0.192	2.250	498.184
主效应 Main effect								
来源 Source		磷酸氢钙 DCP	36.69	20.04	5.00	3.11	87.38	12 315.95[a]
		磷酸一二钙 MDCP	35.65	19.75	5.51	3.06	85.68	15 861.35[b]
		SEM	2.970	0.538	0.292	0.090	1.19	283.63
添加水平 Supplemental level/%		0.075	31.65[a]	13.02[a]	3.71[a]	1.522[a]	64.40[a]	7 371.02[a]
		0.150	30.46[a]	18.14[b]	4.18[a]	3.085[b]	89.84[b]	13 372.84[b]
		0.225	37.19[b]	21.11[c]	5.51[b]	3.313[bc]	91.67[b]	14 521.15[b]
		0.300	39.80[bc]	22.37[bc]	6.19[b]	3.792[d]	92.74[b]	15 727.18[b]
		0.375	41.74[c]	24.86[d]	6.60[b]	3.694[cd]	93.98	19 451.07[c]
		SEM	4.298	0.922	0.457	0.142	1.88	448.46
P 值 *P*-value		模型 Model	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
		来源 Source	0.400	0.726	0.224	0.684	0.317	<0.001
		添加水平 Supplemental level/%	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
		来源×添加水平 Source×supplemental level	0.213	0.985	0.184	0.856	0.785	<0.001

表 6　不同磷来源和添加水平对 42 日龄肉鸭胫骨指标的影响

Table 6　Effects of different phosphorus sources and supplemental levels on tibia indexes of meat ducks at 42 days of age

项目 Items		添加水平 Supplemental level/%	胫骨灰分含量 Tibia ash /%	胫骨钙含量 Tibia Ca/%	胫骨磷含量 Tibia P/%	胫骨重量 Tibia weight/g	胫骨长度 Tibia length/mm	胫骨强度 Tibia strength/g
来源 Source	磷酸氢钙 DCP	0.12	41.32[a]	23.59[a]	5.42[a]	7.20[a]	110.75[a]	18 894.46[a]
		0.18	48.38[b]	20.93[a]	6.29[ab]	8.38[b]	116.87[b]	23 089.76[b]
		0.24	51.35[bc]	22.44[ab]	6.11[ab]	8.91[b]	118.57[b]	25 975.42[b]
		0.30	51.76[c]	26.46[b]	6.92[b]	8.07[ab]	115.17[b]	24 460.44[b]
	磷酸一二钙 MDCP	0.12	34.71[a]	13.32[a]	5.42[a]	6.20[a]	111.82[a]	17 685.28[a]
		0.18	51.33[b]	24.59[b]	7.86[b]	8.05[b]	115.00[ab]	19 364.20[a]
		0.24	52.82[b]	24.87[b]	6.96[ab]	8.17[b]	117.78[b]	25 449.08[b]
		0.30	53.39[b]	30.75[c]	6.78[ab]	8.58[b]	118.46[b]	26 464.61[b]
		SEM	2.563	3.243	0.915	0.564	1.432	2 653.88
主效应 Main effect								
来源 Source		磷酸氢钙 DCP	48.20	23.35	6.19	8.14	115.339	12 305.32
		磷酸一二钙 MDCP	48.11	23.38	6.64	7.75	115.767	16 038.18
		SEM	1.050	0.788	0.206	0.18	0.79	696.25
添加水平 Supplemental level/%		0.12	38.02[a]	18.45[a]	5.42[a]	6.70[a]	111.29[a]	18 289.87[a]
		0.18	49.85[b]	22.76[b]	7.07[b]	8.22[b]	115.94[b]	21 226.98[b]
		0.24	50.92[b]	23.66[b]	6.32[b]	8.54[b]	118.18[b]	25 712.25[c]
		0.30	51.29[b]	28.60[c]	6.85[b]	8.32[b]	116.82[b]	25 462.53[c]
		SEM	1.485	1.115	0.291	0.25	1.12	984.64
P 值 *P*-value		模型 Model	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
		来源 Source	0.950	0.978	0.123	0.122	0.705	0.385
		添加水平 Supplemental level	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.001	<0.001
		来源×添加水平 Source×supplemental level	0.105	<0.001	0.168	0.171	0.395	0.248

2.3 不同磷来源和添加水平对血清生化指标的影响

不同磷来源和添加水平对 21 日龄肉鸭血清中钙、磷含量和碱性磷酸酶活性的影响见表 7。由表可以看出，磷来源对血清磷含量的影响显著（P<0.05），与 DCP 相比，MDCP 显著降低肉鸭血清磷含量（P<0.05），但磷来源对血清钙含量、碱性磷酸酶活性无显著影响（P>0.05）。0.075%添加组血清钙、磷含量显著高于其他 4 组（P<0.05），0.075%、0.150%添加组血清碱性磷酸酶活性显著高于其他 3 组（P<0.05）。磷添加水平对血清钙、磷含量及碱性磷酸酶活性影响显著（P<0.05），但磷来源、来源与添加水平互作对血清钙、磷含量及碱性磷酸酶活性没有显著影响（P>0.05）。

不同磷来源和添加水平对 42 日龄肉鸭血清中钙、磷含量和碱性磷酸酶活性的影响见表 8。由表可以看出，磷添加水平对血清磷含量、碱性磷酸酶活性影响显著（P<0.05），随着 DCP 和 MDCP 的添加，血清磷含量和碱性磷酸酶活性逐渐降低。0.12% DCP 添加组的血清磷含量显著高于其他 DCP 添加组（P<0.05）。磷添加水平对血清钙含量没有显著影响（P>0.05）。磷来源、来源与添加水平互作对血清钙、磷含量及碱性磷酸酶活性没有显著影响（P>0.05）。

由此可见，要维持肉鸭的正常生理功能，磷的添加水平在前期应高于 0.15%（饲粮非植酸磷水平为 0.280%），由更为敏感的碱性磷酸酶推断，磷的添加水平应该高于 0.225%（饲粮非植酸磷水平为 0.355%）；后期磷的添加水平应高于 0.18%（饲粮非植酸磷水平为 0.305%）。

表 7　不同磷来源和添加水平对 21 日龄肉鸭血清钙、磷含量和碱性磷酸酶活性的影响

Table 7　Effects of different phosphorus sources and supplemental levels on serum calcium, phosphorus contents and alkaline phosphatase activity of meat ducks at 42 days of age

项目 Items		添加水平 Supplemental level/%	钙 Ca/（mmol/L）	磷 P/（mmol/L）	碱性磷酸酶 ALP/（U/L）
来源 Source	磷酸氢钙 DCP	0.075	2.33[a]	3.30[a]	1 220.63[a]
		0.150	1.79[b]	1.22[b]	1 180.25[a]
		0.225	1.61[b]	1.05[b]	703.32[b]
		0.300	1.63[b]	1.40[b]	363.27[b]
		0.375	1.70[b]	1.24[b]	531.20[b]
	磷酸一二钙 MDCP	0.075	2.13[a]	2.17[a]	1 061.06[a]
		0.150	1.54[b]	1.44[b]	1 021.45[a]
		0.225	1.39[b]	0.85[b]	679.00[b]
		0.300	1.71[b]	0.92[b]	386.13[b]
		0.375	1.71[b]	1.39[b]	577.88[b]
	SEM		0.058	0.147	55.342
主效应 Main effect					
来源		磷酸氢钙 DCP	1.81	1.61[a]	799.73

Source	磷酸一二钙 MDCP	1.70	1.35[b]	796.37
	SEM	0.071	0.175	57.505
添加水平	0.075	2.24[a]	2.78[a]	1 148.10[a]
Supplemental level/%	0.150	1.66[b]	1.33[b]	1 100.85[a]
	0.225	1.50[b]	0.85[b]	841.38[b]
	0.300	1.67[b]	1.16[b]	374.70[c]
	0.375	1.71[b]	1.31[b]	554.54[bc]
	SEM	0.113	0.277	90.916
P 值	模型 Model	0.006	<0.001	<0.001
P-value	来源 Source	0.250	0.031	0.904
	添加水平 Supplemental level	0.001	<0.001	<0.001
	来 源 × 添 加 水 平 Source×supplemental level	0.763	0.417	0.428

表 8　不同磷来源及添加水平对 42 日龄肉鸭血清钙、磷含量和碱性磷酸酶活性的影响

Table 8　Effects of different phosphorus sources and supplemental levels on serum calcium, phosphorus contents and alkaline phosphatase activity of meat ducks at 42 days of age

项目 Items		添加水平 Supplemental level/%	钙 Ca/（mmol/L）	磷 P/（mmol/L）	碱性磷酸酶 ALP/（U/L）
	磷酸氢钙 DCP	0.12	2.10	2.42[a]	1 323.02[a]
		0.18	2.25	1.67[b]	727.03[b]
		0.24	2.10	1.64[b]	447.55[c]
来源		0.30	2.23	0.87[b]	518.45[bc]
Source	磷酸一二钙 MDCP	0.12	2.10	2.08[a]	1 311.00[a]
		0.18	1.92	1.78[b]	516.18[b]
		0.24	1.87	1.63[b]	345.18[b]
		0.30	1.95	0.60[c]	462.57[b]
		SEM	0.070	0.145	62.984
主效应 Main effect					
来源 Source		磷酸氢钙 DCP	2.17	2.17	754.01
		磷酸一二钙 MDCP	1.96	1.96	669.98
		SEM	0.104	0.183	50.814
添加水平		0.12	2.10	2.13[a]	1 317.01[a]
Supplemental level/%		0.18	2.10	1.72[a]	644.11[b]
		0.24	2.00	1.63[a]	401.02[c]
		0.30	2.09	0.74[b]	490.51[bc]
		SEM	0.147	0.258	71.851
P 值		模型 Model	0.873	0.040	<0.001
P-value		来源 Source	0.163	0.798	0.249

添　加　水　平 Supplemental level	0.943	0.003	<0.001
来源×添加水平 Source×supplemental level	0.863	0.959	0.886

2.4　生物学效价

综合肉鸭体重、体增重和胫骨指标（表 9），相对于 DCP（100%），MDCP 对肉鸭的生物学利用率是 109.85%。

表9　MDCP的相对生物学利用率

Table 9　Relative bioavailability of MDCP

所选效应指标 Selected effect index	多元线性回归方程 Multiple linear regression equation	MDCP 的相对生物学利用率 Relative bioavailability of MDCP/%	P 值 P-value	R^2
21 日龄体重 Body weight at 21 days of age	Y=0.245+316.873$X(s)$+287.927$X(t)$	90.87	0.016	0.691
1~21 日龄平均日增重 Average daily gain during 1 to 21 days of age	Y=15.294+13 116.606$X(s)$+12 355.394$X(t)$	94.2	0.018	0.625
21 日龄胫骨钙含量 Tibia Ca content at 21 days of age	Y=11.524+3 551.939$X(s)$+3 386.727$X(t)$	109.43	<0.001	0.651
21 日龄胫骨磷含量 Tibia P content at 21 days of age	Y=2.869+908.485$X(s)$+1 211.515$X(t)$	133.36	<0.001	0.859
21 日龄灰分含量 Tibia ash content at 21 days of age	Y=26.911+4 045.039$X(s)$+4 357.667$X(t)$	107.73	<0.001	0.804
21 日龄胫骨强度 Tibia strength at 21 days of age	Y=62.366+30 391.576$X(s)$+39 628.424$X(t)$	130.39	0.016	0.691
42 日龄体重	Y=1.469+430.65$X(s)$+436.201$X(t)$	101.26	0.038	0.729

Body weight at 42 days of age					
22~42 日龄平均日增重 Average daily gain during 22 to 42 days of age	$Y=51.797+11\ 574.753X(s)+11\ 935.247X(t)$	103.11		0.035	0.588
42 日龄胫骨钙含量 Tibia Ca content at 42 days of age	$Y=12.397+4\ 886.790X(s)+5\ 556.543X(t)$	113.71		<0.001	0.584
42 日龄胫骨磷含量 Tibia P content at 42 days of age	$Y=5.172+502.840X(s)+673.827X(t)$	134.11		<0.001	0.737
42 日龄胫骨灰分含量 Tibia ash content at 42 days of age	$Y=31.980+7\ 538.889X(s)+7\ 865.278X(t)$	104.33		<0.001	0.687
42 日龄胫骨强度 Tibia strength at 42 days of age	$Y=13.571+4\ 421.441X(s)+4\ 246.225X(t)$	96.32		<0.001	0.700
MDCP 的相对生物学利用率 Relative bioavailability of MDCP			109.85%		

3 讨　论

3.1 磷来源对肉鸭生长性能的影响

磷在消化道吸收的主要部位在十二指肠与空肠，主要以离子态形式吸收，然后迅速分布到机体各部位，体内80%的磷存在于骨骼和牙齿中，其余存在于软组织和体液中[7]。机体磷的稳定主要取决于小肠对磷的吸收、肾脏的重吸收与排泄以及细胞外液与骨骼储存池之间不断交换。说明磷的转运离不开水。DCP属于枸溶性磷酸盐，难溶于水，溶于盐酸或柠檬酸，动物对其利用率较低，大量未被利用的磷排泄到环境中，对环境造成极大的污染。欧洲科学家在20世纪90年代末期研制了MDCP，用以代替DCP。MDCP是DCP和MCP的共晶结合物，是一种水溶性磷酸盐和枸溶性磷酸盐相结合的饲料添加剂，其中MCP是水溶性磷酸盐，约占60%。研究表明，MDCP作为磷来源，动物对其有效成分的吸收率比DCP好，其粪便的残留量较少。MDCP和DCP在家禽的饲喂效果开展过一系列研究。万荣等[8]研究表明，不同来源的MDCP饲喂肉鸡的效果均优于DCP，提高了肉鸡体重、

平均日增重和胫骨灰分含量。伍爱民等[9]研究表明，与DCP相比，MDCP改善了肉鸡的体重、体增重、胫骨钙含量、胫骨磷含量和人胫骨强度。夏良宙等[10]研究表明，MDCP组肉鸡的平均日增重和饲料转化率优于DCP组，但差异不显著。但也有研究表明，MDCP组的胫骨磷含量显著低于DCP组；MDCP组的干物质利用率低于DCP组，但差异不显著[11]。陈晓春等[12]在蛋鸡上的研究显示，以磷酸二氢钾（MPP）为标准，磷来源的相对生物学效价从大到小依次为：MDCP、DCP、MCP、MPP，表明MDCP和DCP都是肉鸭饲料较好的磷来源。谭占坤等[13]认为，MDCP可显著提高试验后期（21～24周）蛋鸡的平均日采食量，但试验全期以MDCP为磷来源的蛋鸡生长性能和蛋壳质量与以DCP为磷来源的蛋鸡无显著差异，说明MDCP可以替代DCP。本试验也发现MDCP组肉鸭的平均日增重和饲料转化率有优于DCP组的趋势，但差异不显著。本试验结果表明，综合肉鸭体重、体增重和胫骨矿化指标，相对于DCP（100%），MDCP对肉鸭的生物学利用率是109.85%；说明MDCP可以替代DCP应用于肉鸭生产当中。

3.2　磷添加水平对肉鸭生长性能的影响

钙和磷都是动物机体所必需的常量矿物质。钙、磷含量的高低会直接影响动物的生长发育，同时磷也是继蛋白质和能量之后的第3种较昂贵的饲料原料[14]。适宜的钙、磷摄入量可促进钙、磷的吸收和在骨骼中的沉积，钙磷比过高或过低均影响钙、磷的吸收和沉积。过量的磷不能被动物完全吸收，排出体外会造成严重的环境污染[15]。朱晓英[16]研究表明，饲粮总磷水平过低会降低产蛋率和平均蛋重，蛋壳品质和骨重也会下降。Gordon等[17]和Sohail等[18]研究表明，随着磷摄入量的提高，蛋鸡采食量不断提高，并具有线性或二次曲线效应。马霞等[19]研究表明，与0.19%～0.27%非植酸磷水平相比，0.11%和0.15非植酸磷水平显著降低蛋鸡的产蛋率、耗料量和平均蛋重，提高料蛋比。Vandepopuliere等[20]表明，与0.3%的非植酸磷水平相比，饲粮非植酸磷水平为0.2%时蛋鸡产蛋率、采食量和平均蛋重显著降低。本试验与上述研究结果一致，肉鸭体重、平均日增重、平均日采食和料重比均不同程度地受到添加磷水平的影响。随着DCP或MDCP添加水平由0.075%上升到0.225%，肉鸭21日龄体重、平均日增重、平均日采食量逐渐提高，2种磷来源的0.12%添加组的42日龄体重、平均日增重、平均日采食显著低于其他3组，而其他3组之间差异不显著。本试验发现，对于1~21日龄肉鸭来说，饲粮添加0.225%的MDCP或者说0.355%的饲粮非植酸磷水平是最为适宜的；对于22～42日龄肉鸭来说，饲粮MDCP的适宜添加水平为0.18%或者说饲粮非植酸磷水平为0.305%。

3.3 磷来源和添加水平对肉鸭胫骨指标的影响

骨骼是肉鸭体内储备磷的主要场所，对维持肉鸭体内磷的稳恒状态起到十分重要的作用。雷乔波等[21]研究表明，饲喂0.14%非植酸磷水平的蛋鸡显著降低了胫骨钙含量。Said等[3]研究表明，0.4%的总磷水平显著降低蛋鸡胫骨灰分的含量，随着总磷水平的升高蛋鸡胫骨灰分含量显著增加。Hulan等[22]和Venäläinen等[23]报道认为，随饲粮钙、磷水平的升高，胫骨灰分含量随之增加，但过高的钙、磷水平则会降低胫骨灰分含量。同时，高磷(非植酸磷水平0.65%)饲粮没有降低肉鸡的胫骨钙、磷含量。本试验发现，肉鸭最大胫骨含量和胫骨强度的非植酸磷水平前期为0.505%，后期为0.425%。且肉鸭胫骨灰分、钙、磷含量和胫骨强度随着磷水平的增加而线性升高。前期低磷（非植酸磷水平0.3%）饲粮显著降低了胫骨灰分含量和胫骨强度。这与Yan等[24]、Atencio等[25]和呙于明等[26]的研究结果一致。这可能是由于低磷饲粮的磷未得到满足，或是由于钙、磷比例严重失调，在动物消化道中形成不可溶、难以被吸收利用的钙、磷复合物，从而减少骨骼中灰分的沉积。同时，分析认为可能是由于骨骼在前期生长速度较快，对钙、磷的需要量较大，而饲粮中的磷又不能满足肉鸭生长发育的需要，因此必须动用骨骼中沉积的磷以弥补饲粮中磷的不足，这样就会使骨矿化程度下降，最终造成骨强度降低。因此钙、磷的互作效应有待进一步研究。

3.4 磷来源和添加水平对肉鸭血清生化指标的影响

碱性磷酸酶在医学和分子生物学等领域有广泛的用途，在临床医学上测定碱性磷酸酶的活性已成为诊断和监测多种疾病的重要手段。碱性磷酸酶主要用于阻塞性黄疸、原发性肝癌、继发性肝癌、胆汁淤积性肝炎等检查，患这些疾病时，肝细胞过度制造碱性磷酸酶，经淋巴道和肝窦进入血液。同时由于肝脏内胆道胆汁排泄障碍，反流入血而引起血清碱性磷酸酶活性明显升高[27]。糖尿病肾病患者较非糖尿病肾病患者血清磷含量高，更早出现高磷血症。在动物模型中已经证实，高磷可导致肾脏结构变化和肾功能下降[28]。绘制 153 例慢加急性肝衰竭患者的生存曲线，生存曲线表明血清磷含量小于 0.81 mmol/L 的生存率（88.0%）较血清磷含量大于 0.81 mmol/L 的生存率（67.5%）高。血清磷作为影响慢加急性肝衰竭预后的一种新的独立危险因素，其血清含量与慢加急性肝衰竭的预后呈负相关[29]。本试验发现，随着 DCP 和 MDCP 的添加，血清磷含量和碱性磷酸酶活性逐渐降低，但血清钙含量不受饲粮中磷来源和添加水平的影响。血清磷含量升高常伴随着甲状旁腺功能减退，慢性肾功能不全、维生素 D 中毒、甲状腺功能亢进、肢端肥大症、酮症酸中毒、乳酸中毒等；而碱性磷酸酶是一种功能性酶，碱性磷酸酶活性升高主要与肝脏和胆囊疾病有关。可见，要维持肉鸭的正常生理功能，MDCP 的添加水平在前期应高于 0.15%（非植酸磷

水平 0.280%），由更为敏感的碱性磷酸酶推断，MDCP 的添加水平应该高于 0.225%（非植酸磷水平 0.355%）；后期 MDCP 的添加水平应高于 0.18%（非植酸磷水平 0.305%）。

4 结 论

① 综合肉鸭体重、体增重和胫骨矿化指标，相对于 DCP（100%），MDCP 对肉鸭的生物学利用率是 109.85%。

② 对于 1~21 日龄肉鸭，饲粮 MDCP 的适宜添加水平为 0.225%；对于 22~42 日龄肉鸭，饲粮 MDCP 的适宜添加水平为 0.18%。

参考文献：

[1] HUFF W E, MOORE M P,Jr.,WALDROUP P W,et al.Effect of dietary phytase and high available phosphorus corn on broiler chicken performance[J].Poultry Science,1998,77(12):1899–1904.

[2] 李佳,吴东波.添加植酸酶日粮不同磷水平和钙磷比对生长肥育猪血液生化指标和骨骼性能的影响[J].畜禽业,2007(4):8–11.

[3] SAID N W,SULLIVAN T W,SUNDE M L,et al.Effect of dietary phosphorus level and source on productive performance and egg quality of two commercial strains of laying hens[J].Poultry Science,1984,63(10):2007–2019.

[4] 张国.磷酸一二钙(MDCP)应是饲料磷酸盐的发展趋势[J].磷肥与复肥,2008,23(1):39–40.

[5] 吴名剑,高艺,蒋新宇,等.火焰原子吸收光谱法测定烟草中的钙[J].光谱实验室,2004,21(4):796–799.

[6] SANDOVAL M,HENRY P R,AMMERMAN C B,et al.Relative bioavailability of supplemental inorganic zinc sources for chicks[J].Journal of Animal Science,1997,75(12):3195–3205.

[7] 杨凤.动物营养学[M].2版.北京:中国农业出版社,2004.

[8] 万荣,谢木林.新型磷源III型磷酸氢钙在肉鸡上相对生物学利用率的应用研究[J].饲料广角,2014(16):16–19.

[9] 伍爱民,白世平,张克英,等.磷酸一二钙对肉仔鸡的相对生物学利用率评定[C]//第六次全国饲料营养学术研讨会论文集.杨凌:中国畜牧兽医学会,2010.

[10] 夏良宙,李霞,万荣.不同种类和来源磷酸钙盐对肉鸡生产性能和养分代谢的影响[J].饲料工业,2014(S1):48–52.

[11] 余洋.不同类型磷酸盐对蛋鸡生产性能、骨骼质量和鸡蛋品质的影响[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2015.

[12] 陈晓春,姜光丽,周光荣.磷酸一二钙在产蛋鸡配合饲料中的应用研究[J].中国家禽,2007,29(22):12–15.

[13] 谭占坤,白世平,张克英,等.磷来源与水平对蛋鸡生产性能和蛋壳质量的影响[J].动物营养学报,2011,23(10):1684–1696.

[14] LEI X G,STAHL C H.Nutritional benefits of phytase and dietary determinants of its efficacy[J].Journal of Applied Animal Research,2000,17(1):97–112.

[15] TILMAN D,FARGIONE J,WOLFF B,et al.Forecasting agriculturally driven global environmental change[J].Science,2001,292(5515):281–284.

[16] 朱晓英,侯加法.缺磷日粮对笼养蛋鸡生产性能及内分泌的影响[J].中国兽医科学,2004,34(1):62–66.
[17] GORDON R W,ROLAND D A.Performance of commercial laying hens fed various phosphorus levels,with and without supplemental phytase[J].Poultry Science,1997,76(8):1172–1177.
[18] SOHAIL S S, ROLAND D A.Influence of dietary phosphorus on performance of Hy-line W36 hens[J].Poultry Science,2002,81(1):7583.
[19] 马霞,朱连勤,朱风华,等.低磷日粮对海兰褐蛋鸡生产性能和蛋品质的影响[J].畜牧与兽医,2007,39(10):41–43.
[20] VANDEPOPULIERE J M,LYONS J J.Effect of Inorganic phosphate source and dietary phosphorus level on laying hen performance and eggshell quality[J].Poultry Science,1992,71(6):1022–1031.
[21] 雷乔波,石凌霄,张克英,等.不同剂型植酸酶对蛋鸡产蛋性能、蛋品质和骨骼质量的影响[J].动物营养学报,2010,22(5):1374–1381.
[22] HULAN H W,DE GROOTE G,FONTAINE G,et al.The effect of different totals and ratios of dietary calcium and phosphorus on the performance and incidence of leg abnormalities of male and female broiler chickens[J].Poultry Science,1985,64(6):1157–1169.
[23] VENÄLÄINEN E,VALAJA J,JALAVA T.Effects of dietary metabolisable energy,calcium and phosphorus on bone mineralisation,leg weakness and performance of broiler chickens[J].British Poultry Science,2006,47(3):301–310.
[24] YAN F,ANGEL R,ASHWELL C,et al.Evaluation of the broiler's ability to adapt to an early moderate deficiency of phosphorus and calcium[J].Poultry Science,2005,84(8):1232–1241.
[25] ATENCIO A,EDWARDS H M,Jr,PESTI G M.Effect of the level of cholecalciferol supplementation of broiler breeder hen diets on the performance and bone abnormalities of the progeny fed diets containing various levels of calcium or 25-hydroxycholecalciferol[J].Poultry Science,2005,84(10):1593–1603.
[26] 呙于明,邵宪萍,丁角立,等.生长后期日粮钙、磷水平对肉仔鸡生产性能及胫骨矿化度的影响[J].中国饲料,1995(13):10–11.
[27] 王秋颖.碱性磷酸酶特性及其应用的研究进展[J].中国畜牧兽医,2011,38(1):157–161.
[28] RAO S K,ROLAND D,ORBAN J I,et al.Age at sexual maturity influences the response of single comb White Leghorn pullets to marginal and low levels of dietary phosphorus[J].Journal of Nutrition,1995,125(5):1342–1350.
[29] 郭倩.血清磷对慢加急性肝衰竭预后判断的价值[D].硕士学位论文.郑州:郑州大学,2015.

A study of Relative Bioavailability of Mono-Dicalcium Phosphate on Meat Ducks

LI Wenjing CHANG Wenhuan* CHEN Zhimin ZHENG Aijuan LIU Guohua

(*Key Laboratory of Feed Biotechnology of Agricultural Ministry, National Engineering Research Center of Biological Feed, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: This experiment was to study the effects of dicalcium phosphate (DCP) and mono-dicalcium phosphate (MDCP) and their supplemental levels (prior period, 0.075, 0.150, 0.225, 0.300 and 0.375; later period, 0.12%, 0.18%, 0.24% and 0.30%) on performance, serum biochemical indexes and tibia indexes of meat ducks by two factor randomized block design, and to assess the relative bioavailability of MDCP for meat ducks. A total of 960 one-day-old Cherry Valley ducks were randomly divided into 10 groups with 6 replicates per group and 16 birds per replicate in the prior period (1 to 21 days of age); and a total of 960 one-day-old Cherry Valley ducks were randomly divided into 8 groups with 6 replicates per group and 15 ducks per replicate in the later period (22 to 42 days of age). The experiment lasted for 42 days. The results showed as follows: 1) during 1 to 21 days of age, the average daily gain (ADG) and average daily feed intake (ADFI) of meat ducks were significantly increased with DCP or MDCP supplemental levels rising from 0.075% to 0.225% （P<0.05); the feed to gain ratio (F/G) of meat ducks in 0.075% MDCP group was significantly lower than that in other MDCP groups （P<0.05). During 22 to 42 days of age, the ADG and ADFI of meat ducks in 0.12% MDCP or DCP groups were significantly lower than those in other MDCP or DCP groups（P<0.05), the F/G of meat ducks in 0.12% DCP group was significantly higher than that in other DCP groups （P<0.05), the F/G of meat ducks in 0.30% MDCP group was significantly lower than that in other MDCP groups （P<0.05). 2） There was a significant interaction in tibia strength of meat ducks at 21 days of age between phosphorus source and supplemental level （P<0.05), the tibia strength of meat ducks in MDCP groups was significantly higher than in DCP groups （P<0.05); dietary phosphorus supplemental level was significantly affect the tibia indexes of meat ducks at 21 days of age （P<0.05). The tibia ash, calcium and phosphorus contents and tibias strength of meat ducks at 42 days of age were linearly increased with the phosphorus supplemental level increased; there was a significant interaction in tibia calcium content of meat ducks at 42 days of age between phosphorus source and supplemental level （P<0.05). 3） At 21 days of age, the serum

phosphorus content of meat ducks in MDCP group was significantly lower than that in DCP group （P<0.05), the serum calcium and phosphorus contents in 0.075% MDCP or DCP groups was significantly higher than those in other MDCP or DCP groups（P<0.05), the serum alkaline phosphatase activity in 0.075% and 0.150% MDCP or DCP groups was significantly higher than those in other MDCP or DCP groups （P<0.05). At 42 days of age, the serum phosphorus content and alkaline phosphatase activity of meat ducks were decreased with DCP or MDCP supplemental levels increased, the serum phosphorus content in 0.12% DCP group was significantly higher than that in other DCP groups（P<0.05）. In conclusion, MDCP can be used as phosphorus source replacing DCP in duck diets; in this case, the optimal non phytate phosphorous levels in diets for meat ducks are 0.355% and 0.305% for 1 to 21 days of age and 22 to 42 days of age, respectively. According to body weight, body weight gain and tibia indexes, the bioavailability of MDCP relative to DCP（100%）is 109.85% .

Key words: meat ducks; MDCP; DCP; bioavailability

---

*Corresponding author, associate professor, E-mail: changwenhuan@caas.cn （责任编辑　武海龙）